

Научная статья

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОГНОЗНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ЛИХОРАДКОЙ ЗАПАДНОГО НИЛА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

К.В. Жуков¹, Д.Н. Никитин¹, Д.В. Коврижных², Д.В. Викторов¹, А.В. Топорков¹

¹Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт, Россия, 400131, г. Волгоград, ул. Голубинская, 7

²Волгоградский государственный медицинский университет, Россия, 400131, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1

Объектом настоящего исследования являются природно-климатические факторы, оказывающие влияние на заболеваемость лихорадкой Западного Нила (ЛЗН) в Волгоградской области. Цель исследования – охарактеризовать их связь с заболеваемостью и сформировать концептуальную схему прогнозно-аналитической модели для прогнозирования развития эпидемиологической ситуации.

В соответствии с целью исследования выбран подход, заключающийся в выявлении и оценке силы статистической связи набора факторов с заболеваемостью ЛЗН в Волгоградской области. Основным методом исследования являлся корреляционный анализ с последующей оценкой достоверности полученных результатов. Полученные данные позволили установить, что температура воздуха является ведущим потенцирующим фактором в Волгоградской области, оказывающим влияние различной силы на целую группу абиотических и биотических факторов (уровень и температуру воды, численность и активность переносчиков, скорость амплификации вируса в переносчиках).

В ходе исследования установлено, что использование развернутых статистических данных (среднемесячных показателей) повышает точность оценки корреляционных взаимодействий. Также нами была рассмотрена и подтверждена гипотеза о запаздывающем влиянии температуры воздуха на заболеваемость населения и численность переносчиков возбудителя ЛЗН в Волгоградской области с наибольшей выраженностью в годы с максимальным количеством заболевших (1999, 2010, 2012 гг.). Выявлена статистическая связь температуры воздуха, среднегодового уровня воды с заболеваемостью людей ЛЗН и численностью переносчиков возбудителя. Установлена высокая степень корреляции численности переносчиков и заболеваемости ЛЗН. На основе результатов статистического анализа сформирована концептуальная схема прогностической модели для определения уровня заболеваемости ЛЗН в Волгоградской области.

Ключевые слова: лихорадка Западного Нила, вирус Западного Нила, эпидемическая ситуация, прогнозно-аналитическая модель, оценка факторов, природно-климатические особенности, корреляционный анализ, переносчики ЛЗН, Волгоградская область.

© Жуков К.В., Никитин Д.Н., Коврижных Д.В., Викторов Д.В., Топорков А.В., 2022

Жуков Кирилл Вадимович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: zhukofff@inbox.ru; тел.: 8 (8442) 39-33-48; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-3257>).

Никитин Дмитрий Николаевич – научный сотрудник (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; тел.: 8 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6940-0350>).

Коврижных Денис Викторович – кандидат педагогических наук, доцент (e-mail: post@volgmed.ru; тел.: 8 (8442) 38-50-05; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3253-3007>).

Викторов Дмитрий Викторович – доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по научно-экспериментальной работе (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; тел.: 8 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2722-7948>).

Топорков Андрей Владимирович – доктор медицинских наук, доцент, директор (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; тел.: 8 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4657>).

Лихорадка Западного Нила (ЛЗН) – острая природно-очаговая арбовирусная инфекция с трансмиссивным механизмом передачи, клинически протекающая в форме лихорадочно-интоксикационного синдрома, в тяжелых случаях сопровождающаяся поражением ЦНС с явлениями менингита и энцефалита.

Возбудителем заболевания является вирус Западного Нила (ВЗН), принадлежащий семейству *Flaviviridae*, роду *Flavivirus* [1]. Основными переносчиками ВЗН являются комары рода *Culex*, также в качестве переносчиков могут выступать комары рода *Aedes*, *Coquillettidia*, *Culiseta*, *Uranotaenia* и клещи рода *Ixodes*, *Hyalomma*, *Dermacentor* [2–4]. Возбудитель заболевания преимущественно передается через укус инфицированного комара. Описаны случаи передачи ВЗН от матери к плоду через плаценту и при вскармливании грудным молоком, а также артифициального заражения [5–7].

Значимость ЛЗН для общественного здравоохранения в последние десятилетия возрастает, что связано с расширением ее нозоареала, возникновением вспышек с тяжелым течением болезни, отсутствием средств специфического лечения и профилактики.

С момента обнаружения ВЗН в 1937 г. на территории Уганды возбудитель заболевания стремительно расширил ареал. В настоящее время заболеваемость ЛЗН отмечается в странах Американского, Африканского, Южноазиатского, Западно-Тихоокеанского и Европейского регионов, в том числе на территории Российской Федерации.

ЛЗН имеет широкое распространение в Американском регионе. Случаи заболевания (от 700 до 3000) регистрируются ежегодно на территории более 48 штатов США, большое количество из них протекает в нейроинвазивной форме¹.

Заболеваемость ЛЗН регистрируется в 22 странах Европейского региона, за период 2010–2020 гг. выявлено 4218 заболевших. В РФ случаи заболевания отмечены в 30 субъектах, на территории 62 административных образований были обнаружены маркеры возбудителя [8].

На территории Волгоградской области случаи заболевания ЛЗН регистрируются с 1999 г., а их общее количество составляет 44 % от всех зарегистрированных случаев в России. Заболеваемость отмечена в большинстве районов области (с максимальными показателями в г. Волгограде и г. Волжском). В связи с этим выявление основных факторов, оказывающих влияние на заболеваемость ЛЗН в Волгоградской области, а также изучение их корреляционных взаимоотношений и связей остаются актуальным направлением эпидемиологических исследований. На основе полученных данных с использованием статистических и математических методов анализа возможно

создание прогнозно-аналитических моделей, позволяющих оценить вектор развития эпидемиологической обстановки по ЛЗН.

По мнению многих исследователей, моделирование и прогнозирование вспышек трансмиссивных болезней, а в данном случае ЛЗН, является непростой задачей из-за сложности механизмов передачи, включающих взаимодействия между возбудителем, переносчиком и восприимчивым организмом, а также влияния на весь этот комплекс различных внешних факторов.

Общим подходом при моделировании эпидемического процесса арбовирусных инфекций является построение динамических временных рядов, при котором заболеваемость населения рассматривается как функция запаздывающих экологических параметров [9–10]. Преимущество данного статистического подхода, по сравнению с имитационными моделями, заключается в его относительной простоте. Модели могут быть легко параметризованы с помощью временных динамических рядов эпидемиологических данных и сведений о состоянии окружающей среды. Однако основное ограничение подобных моделей заключается в использовании линейных аппроксимаций для нелинейных систем, что приводит к многочисленным упрощающим допущениям. Другими словами, информации о факторах внешней среды достаточно для расчета риска передачи заболевания, но влияние могут оказывать и другие, не связанные с окружающей средой явления (например, после нескольких лет интенсивной передачи ВЗН в популяциях птиц может формироваться иммунитет, что, в свою очередь, потенциально ослабляет передачу ВЗН [12]), для описания воздействия которых необходимо применение сложных и нелинейных математических функций. Тем не менее изучение подобных зависимостей требует внедрения комплексного подхода, разработка которого возможна только после оценки факторов, влияющих на интенсивность эпидемического процесса, с использованием первичных методов статистического анализа, в том числе корреляционного.

Согласно существующим представлениям о закономерностях течения эпидемического процесса арбовирусных инфекций основными факторами, оказывающими ведущее влияние на эпидемический процесс и рассматриваемыми при разработке прогнозов, являются природно-климатические (температура воздуха, количество осадков, уровень воды в природных водоемах и численность переносчиков). Также некоторые экологические (влажность воздуха) и социальные (изменения ландшафта за счет расширения землепользования, проведение дезинсекционных мероприятий, локальные инфраструктурные особенности территорий, национальные

¹ West Nile virus. Final Cumulative Maps & Data for 1999–2019 [Электронный ресурс] // Centers for Disease Control and Prevention. – 2020. – URL: <https://www.cdc.gov/westnile/statsmaps/cumMapsData.html> (дата обращения: 14.04.2022).

обычай и т.д.) факторы способны влиять на передачу возбудителя и, как следствие, на заболеваемость [13, 14]. Кроме того, такие демографические показатели, как возраст и пол заболевших, потенциально связаны с тяжестью течения инфекции и ее выявляемостью и тем самым могут обуславливать выраженность проявлений эпидемического процесса. Следует отметить, при создании прогнозно-аналитических моделей описание и актуальная оценка уровня воздействия данных факторов, как правило, требуют глубокого математического анализа ввиду их неоднородности – исследуемые показатели могут быть как количественными, так и качественными. В связи с чем на данном этапе исследования эти группы показателей не учитывались при проведении анализа и не были включены в концепцию разрабатываемой модели.

Для создания моделей оценки рисков передачи возбудителей (в том числе ЛЗН) чаще всего используют ретроспективные и оперативные климатические и / или метеорологические показатели. Однако применение такого набора данных не всегда позволяет достоверно прогнозировать возможное время и локализацию потенциальных вспышек [15].

Еще одной сложностью при разработке прогностических моделей такого типа является временная стационарность. Использование при анализе временных рядов предполагает, что запаздывающее воздействие факторов окружающей среды на риск заболевания является статичным (например, осадки месяц назад положительно коррелируют с риском сегодня), а не изменяющимся во времени (например, осадки месяц назад могут положительно коррелировать с риском в июле, но отрицательно – в августе). Обозначенная проблема актуальна и для ЛЗН в силу влияния большого количества факторов окружающей среды на численность основного переносчика, его активность и инфицированность, и, как следствие, на заболеваемость. Отдельные подходы, применяемые исследователями для прогнозирования развития эпидемиологической ситуации по ЛЗН, нашли отражение в одной из наших предыдущих работ [16].

Цель исследования – охарактеризовать связь природно-климатических и экологических факторов с заболеваемостью ЛЗН на территории Волгоградской области и сформировать концептуальную схему прогнозно-аналитической модели для оценки развития эпидемиологической ситуации.

Материалы и методы. Нами был выбран подход, заключающийся в выявлении и оценке силы статистической связи набора факторов с заболеваемостью ЛЗН в Волгоградской области. Выбор этого субъекта обусловлен высокой репрезентативностью представленных данных, связанной с длительной регистрацией проявлений инфекции и наибольшей их выраженностью в РФ (44 % от общего числа зарегистрированных случаев заболевания в стране). Для достижения поставленной цели мы использовали корреляционный анализ (во всех случаях была ис-

пользована линейная регрессия) с последующей оценкой достоверности результатов. Необходимо отметить, что корреляционный анализ является методом статистической обработки данных, который широко используется как в российских, так и в зарубежных исследованиях. Результаты корреляционного анализа позволят рассмотреть взаимосвязи факторов с применением собственно математических методов на следующем этапе настоящей работы.

Нами были отобраны факторы, которые способны влиять на реализацию механизма передачи ЛЗН, а именно температура воздуха, численность переносчиков и уровень воды на гидрологических постах. В связи с этим в работе были использованы ретроспективные данные по:

1) среднезимним, среднелетним, среднегодовым температурам и случаям заболевания ЛЗН за период 1999–2019 гг.;

2) среднегодовой и среднесезонной (весенне-осенний период, с апреля по октябрь) численности комаров-переносчиков за период 1999–2018 гг., среднегодовым уровнем и температуре воды гидрологических постов г. Волгограда и п.г.т. Средняя Ахтуба в 2001–2017 гг. (данные за более широкий временной период не были представлены в доступных источниках информации);

3) среднемесячным показателям температуры воздуха и численности переносчиков, а также месячной температуры воздуха за 1999, 2010, 2012 гг. (выбор обоснован сочетанием высоких среднесезонных температур воздуха и регистрации наибольшего числа случаев ЛЗН в Волгоградской области в эти годы).

Корреляционный анализ влияния факторов на заболеваемость ЛЗН осуществляли при помощи программы Microsoft Excel 2016 16.0.13628.20128 (корпорация Microsoft, США). Определение характера распределения исследуемых параметров и оценка статистической значимости осуществлялись с применением открытого программного обеспечения JASP версии 0.14.1 (Амстердамский университет, Нидерланды).

Для определения статистической достоверности корреляционной связи полученные значения сравнивали с критическими значениями коэффициентов ранговой корреляции Пирсона (r), при уровне статистической значимости равной 0,05.

Перед исследованием мы проверили нормальность распределения всех используемых данных с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. По результатам проверки установлено, что распределение значений всех исследуемых факторов является нормальным, поэтому дальнейший анализ выполняли с вычислением коэффициентов корреляции Пирсона.

Результаты и их обсуждение. С использованием данных среднегодовых показателей температур воздуха, уровней воды гидрологических постов г. Волгограда и п.г.т. Средняя Ахтуба, численности переносчиков, а также данных по заболеваемости ЛЗН за период 2001–2017 гг. нами был проведен

многофакторный корреляционный анализ (табл. 1) с целью определения приоритетных групп показателей для дальнейшего изучения.

Полученные значения коэффициента корреляции для среднегодовой температуры воздуха указывают на наличие высокой силы корреляционной связи с заболеваемостью ЛЗН. В то же время сила корреляционной связи уровня воды и численности переносчиков находилась в диапазоне от слабой до очень слабой.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно предположить, что температура воздуха оказывает наиболее значимое влияние на заболеваемость ЛЗН в Волгоградской области. Это может быть обусловлено воздействием температуры на целый ряд факторов, таких как скорость развития, рост численности, активность и инфицированность основных переносчиков ВЗН в природных и антропогенных очагах инфекции, а также прогреваемость природных и искусственных водоемов, являющихся основными местами выплода комаров.

Однако использование усредненных данных для корреляционного анализа не позволяет в полной мере оценить степень влияния каждого фактора. В связи с этим дальнейший анализ с различным набором данных проводился для каждого из анализируемых факторов отдельно.

Оценка силы связи температуры воздуха с заболеваемостью ЛЗН. При оценке влияния среднезимних (декабрь – февраль) и среднелетних (июнь – август) температур на заболеваемость ЛЗН было установлено, что значение R для среднезимних температур имело отрицательную направленность: $-0,094$ ($p = 0,684$), что свидетельствует об отсутствии статистически значимой связи. В то же время значение коэффициента корреляции для среднелетних температур составило $0,631$ ($p = 0,002$), что характеризуется средней силой корреляционной связи с высокой степенью достоверности (рис. 1).

Полностью отрицать влияние средних значений зимних температур на заболеваемость ЛЗН в Волгоградской области нельзя ввиду их влияния на выживаемость основных переносчиков. Так, в подвальных помещениях, где температура воздуха более высокая по отношению к окружающей среде, могут сохраняться условия для выживания личинок комаров в зимний период времени. К тому же по литературным данным известно, что некоторые виды комаров способны перезимовать в местах естественного выплода при температурах ниже -10 °С [17]. В связи с выше-

сказанным на основании данных среднемесячных температур за январь, февраль, декабрь и заболеваемости ЛЗН на территории Волгоградской области за 1999, 2010, 2012 гг. было установлено, что средние температуры в феврале и декабре имели высокую силу корреляционной связи с заболеваемостью ЛЗН (R для февраля составляло $0,809$, $p = 0,4$, для декабря – $0,824$, $p = 0,384$), в то время как средняя температура воздуха в январе в те же годы ($R = 0,125$, $p = 0,92$) имела слабую силу связи. В целом имеется необходимость более детального изучения влияния температуры воздуха в зимний период на заболеваемость и численность переносчиков.

Для дальнейшего анализа нами также были выбраны годы с максимальными значениями заболеваемости ЛЗН и месяцы, в которые средняя температура воздуха была положительной и превышала значения $+3...+5$ °С, что обусловлено возможностью вылета с зимовок основных переносчиков ВЗН – комаров рода *Culex* [18].

С использованием данных о среднемесячной температуре воздуха и зарегистрированных случаях заболевания населения ЛЗН в Волгоградской области за период апрель – октябрь в 1999, 2010 и 2012 гг. был проведен корреляционный анализ, по результатам которого установлена умеренная сила корреляционной связи с заболеваемостью ЛЗН (значение R находилось в диапазоне от $0,36$ до $0,395$ (рис. 2, а, табл. 2)).

С учетом дискретности анализируемых данных нами была рассмотрена гипотеза о кумулятивном эффекте влияния температуры воздуха на заболеваемость. В частности, при анализе временных рядов мы предположили, что воздействие температуры на заболеваемость имеет запаздывающий характер, т.е. наблюдаемая температура воздуха месяц назад положительно коррелирует с текущей заболеваемостью ЛЗН. В связи с этим зарегистрированные случаи заболевания были смещены по временной шкале на один месяц назад (рис. 2, б). Такую временную задержку можно объяснить, во-первых, необходимым временем для прохождения полного цикла развития основных переносчиков. Так, по литературным данным, комарам *Culex pipiens* при температуре 16 °С необходимо около 30 дней для развития от яйца до имаго, а при температуре 24 °С для завершения полного цикла развития потребуется около 12-и дней [19]. Во-вторых, задержка объясняется длительностью инкубационного периода (от 3 до 14 дней) при инфицировании человека возбудителем ЛЗН.

Таблица 1

Результаты многофакторного корреляционного анализа

Влияние на заболеваемость ЛЗН	R	p
Среднегодовой уровень воды (гидрологический пост Волгоград)	0,086	0,744
Среднегодовой уровень воды (гидрологический пост Средняя Ахтуба)	0,135	0,606
Среднегодовая температура воздуха	0,721	0,001
Среднегодовая численность переносчиков	0,069	0,792

Примечание: R – коэффициент корреляции Пирсона, p – уровень статистической значимости.

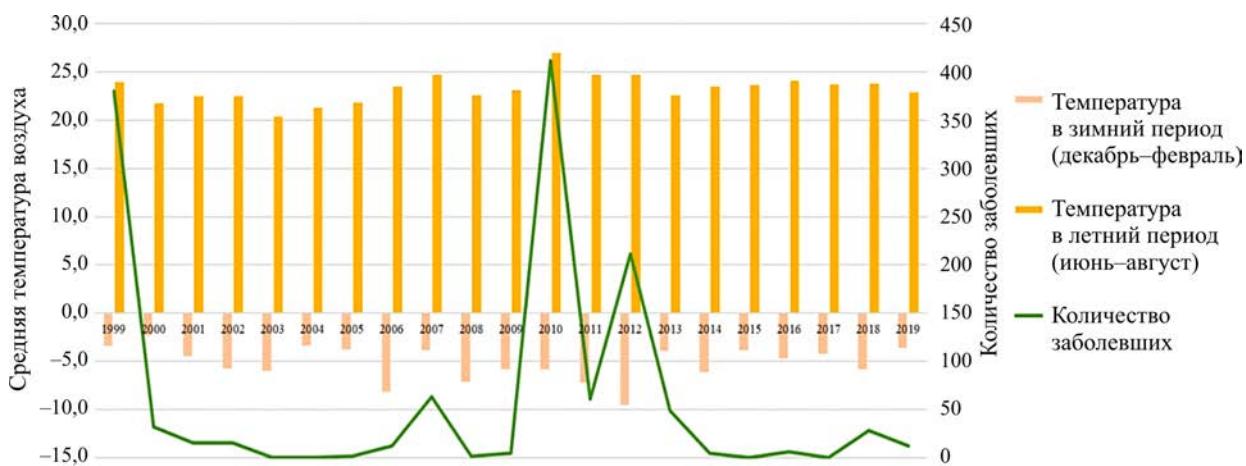


Рис. 1. Корреляционная связь среднезимних и среднесезонных температур воздуха с заболеваемостью ЛЗН в Волгоградской области за период 1999–2019 гг.

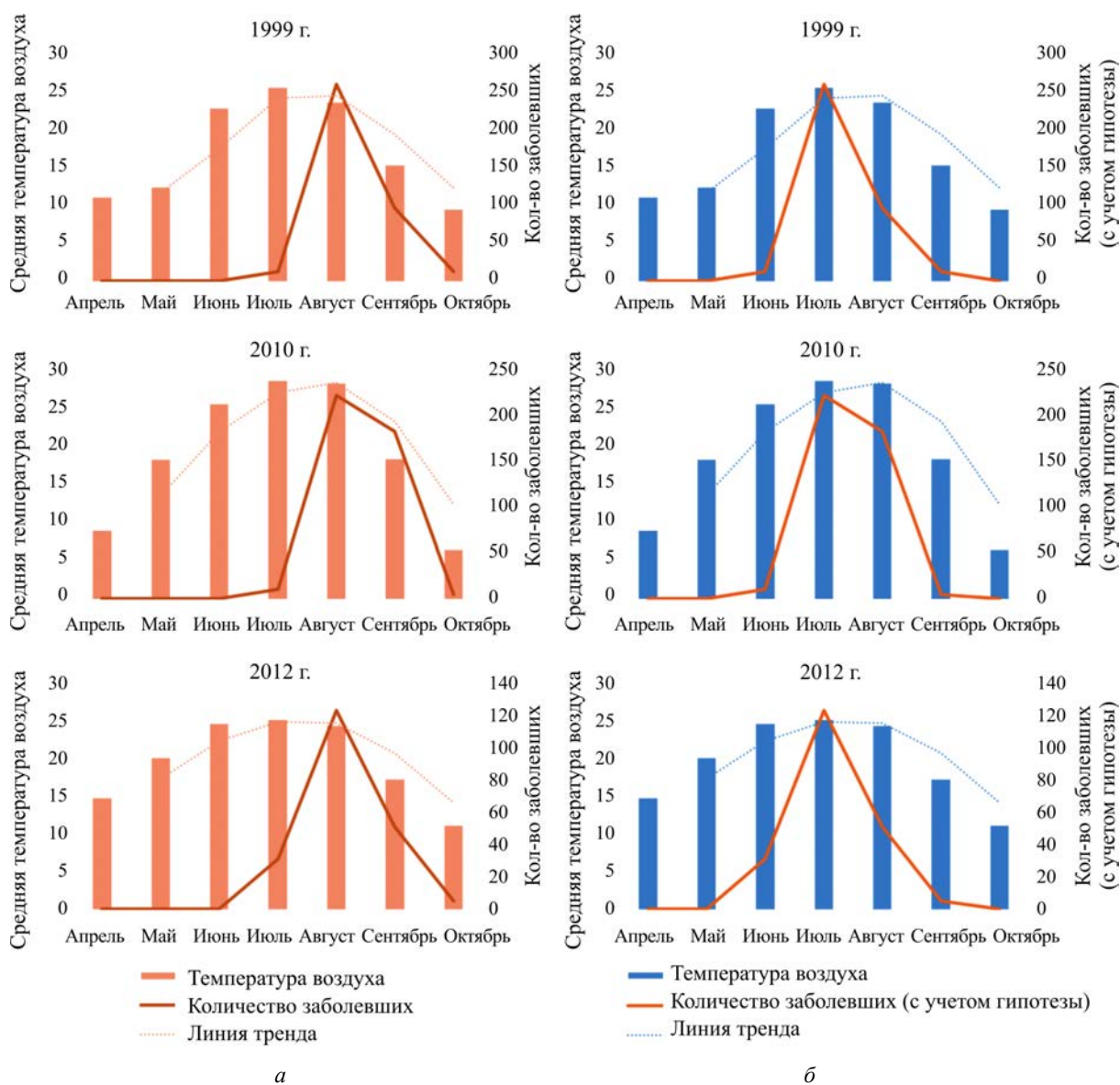


Рис. 2. Оценка силы корреляционной связи среднемесячной температуры воздуха с заболеваемостью ЛЗН: *a* – среднемесячная температура воздуха и заболеваемость ЛЗН за 1999, 2010, 2012 гг.; *б* – среднемесячная температура воздуха и заболеваемость ЛЗН (со смещением значений на один месяц назад) за 1999, 2010, 2012 гг.

Результаты корреляционного анализа связи среднемесячной температуры воздуха с заболеваемостью ЛЗН

Год	$R(p)$	$R_c(p)$	$R_d(p)$
1999	0,386 (0,393)	0,735 (0,06)	0,998 (0,037)
2010	0,36 (0,427)	0,724 (0,066)	0,998 (0,037)
2012	0,395 (0,38)	0,713 (0,072)	0,832 (0,375)

Примечание: R_c – коэффициент корреляции со смещением показателей заболеваемости на один месяц; R_d – коэффициент корреляции со смещением показателей заболеваемости на один месяц в диапазоне температур от 22 до 29 °С; p – уровень значимости корреляционной связи.

При проведении корреляционного анализа с учетом временной задержки (на 12, 21 и 30 дней) сила корреляционной связи увеличилась со средней до высокой, а наибольшее увеличение отмечалось в интервале 30 дней (см. табл. 2). Более того, при анализе данных в диапазоне температур от 22 до 29 °С (нами была рассмотрена линейная регрессия) сила корреляционной связи была очень высокой и приобретала линейный характер с высокой степенью достоверности в 1999 и 2010 гг. При этом в 2012 г. наблюдалось незначительное увеличение силы корреляционной связи, что может быть связано в том числе и с действием других факторов в эпидемический сезон этого года.

Выдвинутая гипотеза была экстраполирована на весь период регистрации заболеваемости ЛЗН в Волгоградской области. Запаздывающее влияние температуры воздуха на заболеваемость отмечено во все годы наблюдения: значение коэффициента корреляции составляло от 0,599 (2013 г.) до 0,837 (2008 г.), а в диапазоне температур 22–29 °С корреляционная связь носила линейный характер в те годы, когда зарегистрированная заболеваемость превышала среднеголетнюю. Тем не менее отсутствие линейной связи в остальные годы требует изучения комплекса факторов, снижающих риск инфицирования.

На основании полученных результатов для Волгоградской области подтверждается гипотеза, согласно которой температуры выше 22 °С, наблюдаемые в текущем месяце, увеличивают риск роста заболеваемости ЛЗН в следующем месяце.

Оценка силы связи температуры воздуха и численности переносчиков. Первым этапом оценки

связи температуры воздуха и численности переносчиков ЛЗН на территории Волгоградской области стало проведение корреляционного анализа с использованием среднегодовых показателей этих факторов за период 1999–2018 гг. (рис. 3).

В результате было установлено достоверное отсутствие статистически значимой корреляционной связи между исследуемыми факторами ($R = -0,153$; $p = 0,52$).

Дальнейший корреляционный анализ проводили, используя данные помесечных температур воздуха в зимний и весенне-осенний периоды, а также среднемесячных показателей численности переносчиков за 1999, 2010, 2012 гг.

При анализе среднемесячных температур в январе, феврале, декабре 1999, 2010, 2012 гг. и среднегодовой численности переносчиков было установлено наличие очень высокой силы корреляционной связи анализируемых факторов в январе и феврале, а также отсутствие статистически значимой связи среднемесячной температуры воздуха и среднегодовой численности переносчиков в декабре за указанные выше годы. Во всех рассмотренных случаях статистическая достоверность полученных результатов была высокой (табл. 3).

При анализе данных помесечных температур воздуха и среднемесячных показателей численности переносчиков за 1999, 2010, 2012 гг. (рис. 4, а, табл. 4) полученные значения коэффициента корреляции продемонстрировали, что сила корреляционной связи находилась в диапазоне от средней до высокой с высокой степенью статистической достоверности.



Рис. 3. Оценка силы корреляционной связи температуры воздуха со среднегодовой численностью переносчиков ЛЗН в Волгоградской области за период 1999–2018 гг.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа для среднемесячной температуры воздуха и среднегодовой численности переносчиков

Месяц	R	p
Январь	0,9995	0,019
Февраль	0,706	0,501
Декабрь	-0,434	0,714

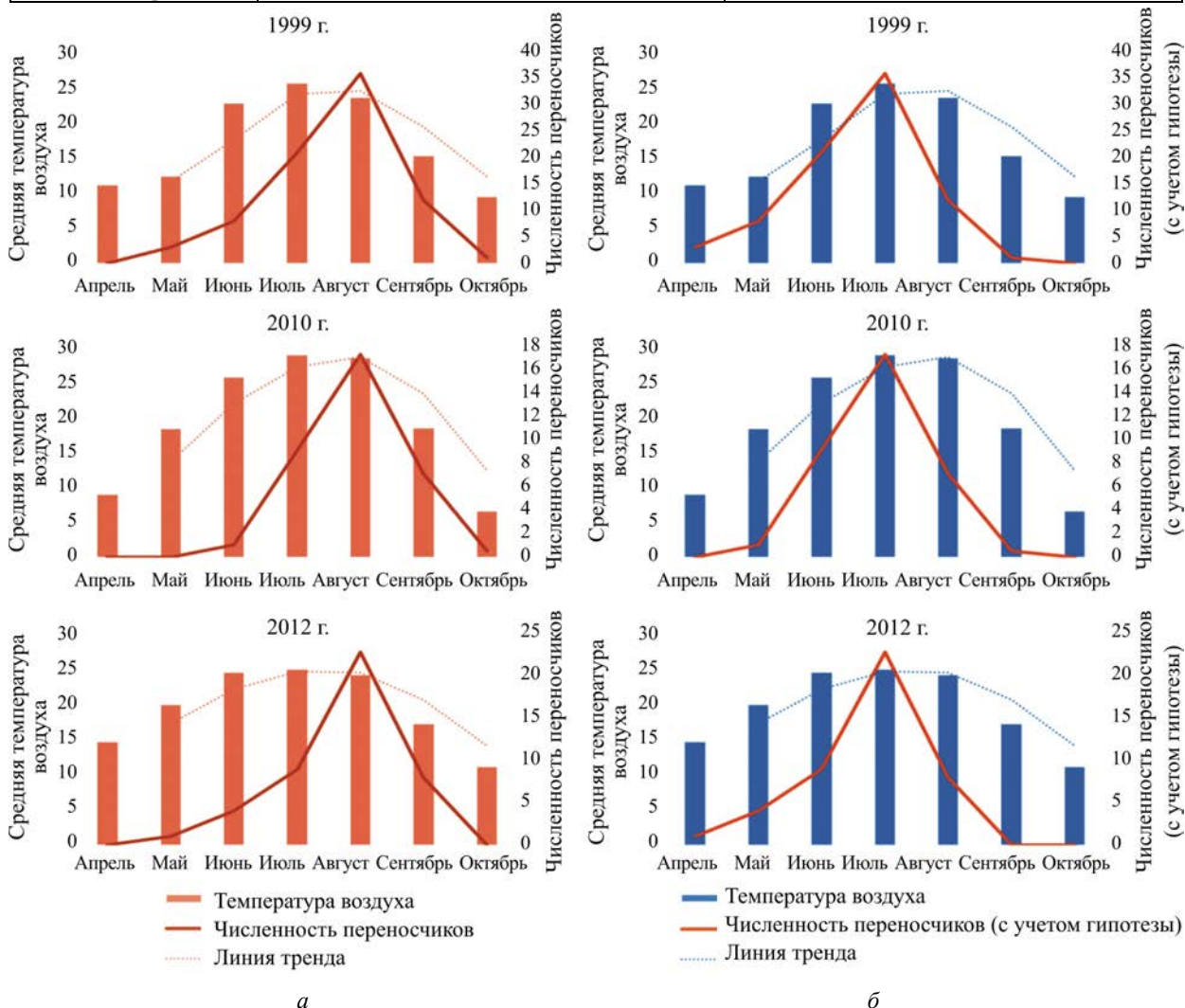


Рис. 4. Оценка силы корреляционной связи среднемесячных показателей температуры воздуха и численности переносчиков ВЗН в Волгоградской области: а – среднемесячные показатели температуры воздуха и численности переносчиков ВЗН за 1999, 2010, 2012 гг.; б – среднемесячные показатели температуры воздуха и численности переносчиков ВЗН (со смещением значений на один месяц назад) за 1999, 2010, 2012 гг.

Таблица 4

Результаты корреляционного анализа связи среднемесячных показателей температуры воздуха и численности переносчиков ВЗН

Год	$R(p)$	$R_c(p)$	$R_d(p)$
1999	0,784 (0,037)	0,844 (0,017)	0,789 (0,421)
2010	0,672 (0,098)	0,807 (0,028)	0,437 (0,712)
2012	0,596 (0,158)	0,771 (0,042)	0,949 (0,204)

Примечание: R_c – коэффициент корреляции со смещением показателей численности переносчиков на один месяц; R_d – коэффициент корреляции со смещением показателей численности переносчиков на один месяц в диапазоне температур выше 22 °С; p – уровень значимости корреляционной связи.

При дальнейшем исследовании временных рядов мы рассматривали гипотезу о кумулятивном влиянии среднемесячной температуры воздуха на численность переносчиков ЛЗН в Волгоградской области.

С учетом особенностей жизненного цикла основных переносчиков и инкубационного периода при заражении ЛЗН (рассмотренных в предыдущем разделе) мы предположили, что наблюдаемая температура воздуха месяц назад положительно коррелирует с численностью переносчиков ЛЗН в текущем месяце. Для подтверждения выдвинутой гипотезы ежемесячная численность комаров в 1999, 2010 и 2012 гг. была сдвинута по временной шкале на один месяц назад (рис. 4, б). В данных условиях полученные результаты корреляционного анализа с учетом линейной регрессии указывали на наличие очень высокой силы корреляционной связи (см. табл. 4). При анализе данных в диапазоне температур свыше 22 °С было обнаружено снижение статистической значимости полученных значений, что может быть связано с увеличением численности переносчиков в предыдущие месяцы (апрель – июнь).

Таким образом, результаты проведенного анализа с высокой степенью достоверности свидетельствуют, что для Волгоградской области соблюдается гипотеза: температуры выше 22 °С, наблюдаемые в текущем месяце, оказывают влияние на увеличение численности основных переносчиков ЛЗН в следующем месяце. При этом влияние температуры на рост численности переносчиков наблюдается в период с апреля по июнь, когда среднемесячная температура воздуха ниже 22 °С. Это указывает, что пороговое значение температуры, необходимое для увеличения численности популяций комаров, ниже такового для роста заболеваемости ЛЗН. По этой причине нами были изучены научные публикации, в которых рассматривалась взаимосвязь температуры возду-

ха и скорости амплификации ВЗН как одного из факторов, определяющего уровень инфицированности переносчиков.

Оценка силы связи температуры воздуха и скорости амплификации вируса в переносчиках (по литературным данным). По данным различных исследований, температура воздуха является основополагающим фактором для амплификации вируса в организме переносчиков. Температурный минимум для развития вируса в организме комара составляет +14 °С. Увеличение температуры способствует возрастанию скорости амплификации вируса. Так, при температуре +14 °С количество вируса, необходимое для инфицирования человека, накапливается через 58 дней, при +18 °С – через 22 дня, при +23,5 °С – через 15 дней, при +30 °С – через 11 суток [20] (рис. 5, а).

На основе литературных данных нами была проведена оценка силы корреляционной связи температуры воздуха и инфицированности переносчиков. Проведенный анализ позволил выявить наличие средней силы связи (в пределах ее верхней границы). Степень достоверности полученных результатов была высокой (табл. 5).

Из дальнейшего анализа были исключены значения температуры ниже +14 °С в связи с тем, что при такой температуре для накопления вируса в организме комара понадобится около двух месяцев, что в большинстве случаев превышает среднюю продолжительность жизни основных переносчиков вируса ЛЗН (рис. 5, б). К тому же температурный диапазон от +18 до +25 °С является оптимальным для активности переносчика.

Проведенный корреляционный анализ (при линейной регрессии) показал наличие сильной корреляционной связи с высокой степенью достоверности между температурой воздуха и скоростью амплификации возбудителя ЛЗН в комарах (см. табл. 5).

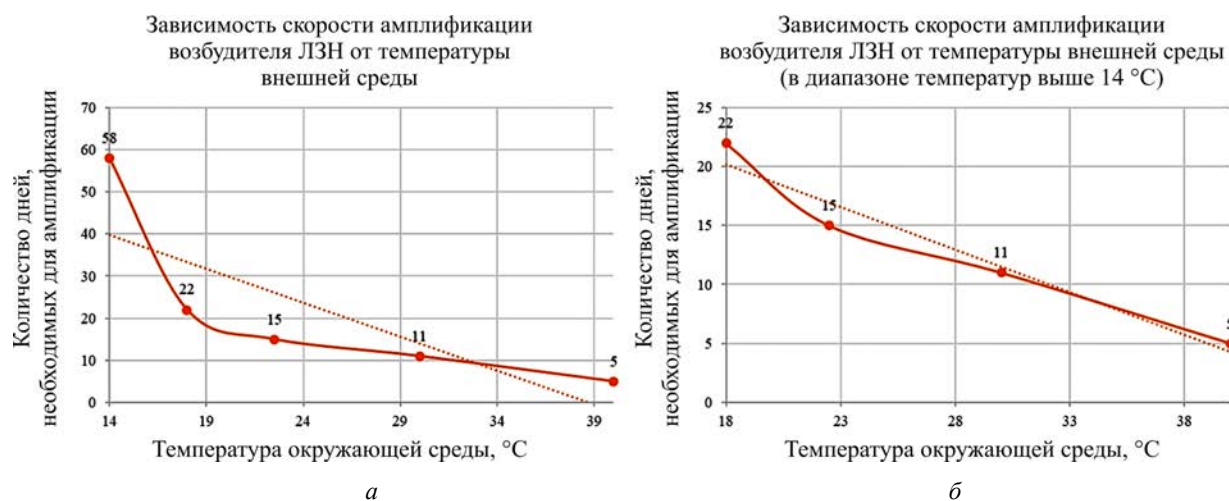


Рис. 5. Оценка силы связи температуры воздуха и скорости амплификации вируса в комаре

Результаты корреляционного анализа связи температуры воздуха и скорости амплификации вируса в комаре

Фактор	R	p
Скорость ампликации	-0,796	0,107
Скорость ампликации в диапазоне температур выше 14 °С	-0,974	0,026

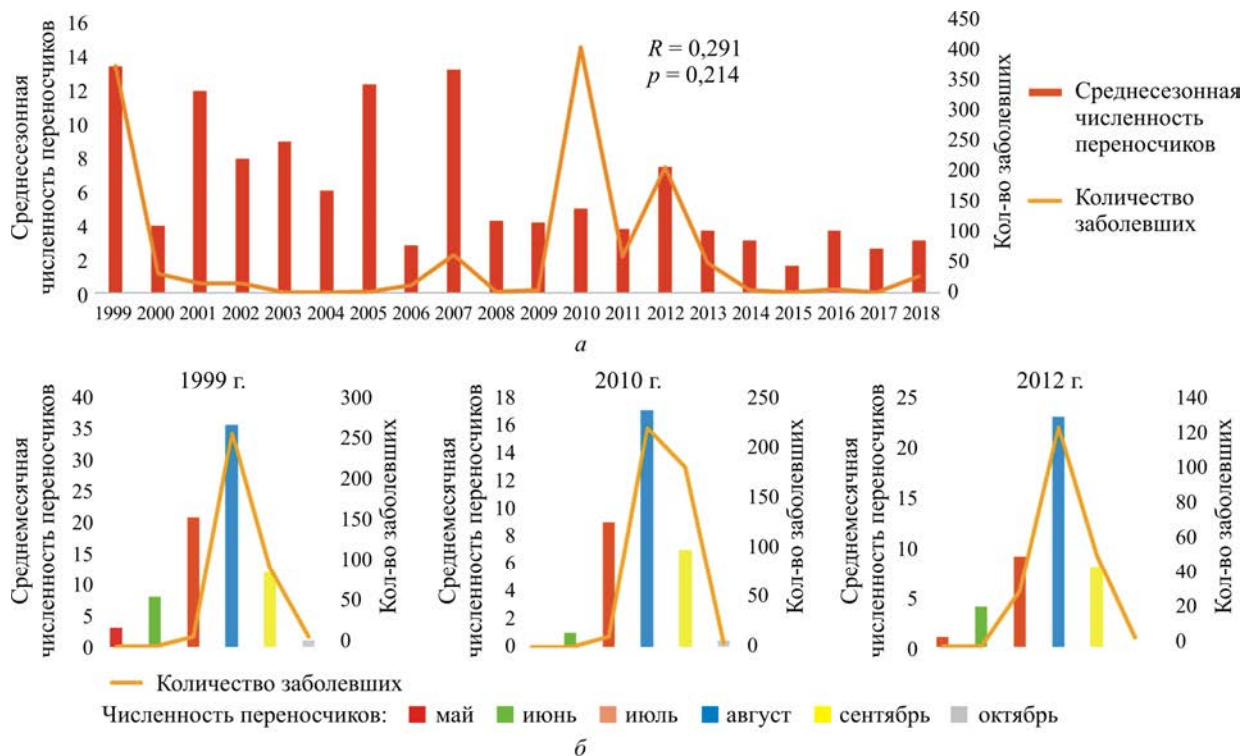


Рис. 6. Оценка силы корреляционной связи между численностью переносчиков и заболеваемостью ЛЗН на территории Волгоградской области за период 1999–2018 гг.

Таким образом, можно предположить, что при температурах выше 14 °С скорость накопления ВЗН в комарах будет увеличиваться, следовательно, будет увеличиваться и риск инфицирования человека, причем чем выше температура, тем выше риск инфицирования. Однако для более детального описания характера этой взаимосвязи необходимы дальнейшие исследования.

Оценка силы статистической связи численности переносчиков и заболеваемости ЛЗН. Для оценки силы статистической связи численности переносчиков и заболеваемости ЛЗН на основе данных среднесезонной численности комаров и данных по ежегодной заболеваемости ЛЗН в Волгоградской области за период 1999–2018 гг. нами также был проведен корреляционный анализ, выявивший наличие слабой связи и низкую достоверность полученных результатов (рис. 6, а).

Дальнейший анализ проводили с набором данных о среднесезонной численности переносчиков и заболеваемости ЛЗН за 1999, 2010, 2012 гг. Значение коэффициента корреляции характеризовало очень слабую силу корреляционной связи ($R = 0,081$; $p = 0,948$).

Однако, несмотря на видимое отсутствие взаимосвязи численности переносчиков и заболеваемости, факт ее наличия не следует отрицать, так как она может иметь более сложный характер и не будет выявляться путем оценки среднесезонных значений. В связи с этим нами исследована статистическая связь среднемесячных показателей численности комаров и ежемесячной заболеваемости ЛЗН в 1999, 2010, 2012 гг. Установлено, что сила корреляционной связи находилась в диапазоне от высокой до очень высокой для различных лет (рис. 6, б, табл. 6). При этом в 2012 г. данный фактор являлся ведущим в формировании уровня заболеваемости.

Исходя из полученных данных, можно утверждать, что наличие высокой численности основных переносчиков с высокой степенью достоверности увеличивает риск инфицирования человека ЛЗН на территории Волгоградской области.

Оценка силы статистической связи численности переносчиков с другими природно-климатическими факторами. Кроме температуры воздуха, на численность переносчиков могут оказывать влияние уровень и температура воды. Ввиду отсутствия полноты статистических данных корреляци-

Таблица 6

Результаты корреляционного анализа среднемесячных показателей численности комаров и заболеваемости ЛЗН

Год	R	p
1999	0,841	0,018
2010	0,811	0,027
2012	0,97	0,001

Таблица 7

Результаты корреляционной оценки связи численности переносчиков, уровня и среднегодовой температуры воды за период 2001–2017 гг.

Показатель	Гидрологический пост г. Волгограда, $R(p)$	Гидрологический пост п.г.т. Средняя Ахтуба, $R(p)$
Уровень воды	0,609 (0,009)	0,503 (0,04)
Среднегодовая температура воды	-0,12 (0,645)	-0,172 (0,509)



Рис. 7. Концептуальная схема прогнозно-аналитической модели: z – заболеваемость ЛЗН в текущем месяце, m – численность переносчиков в текущем месяце, t – температура воздуха в предыдущем месяце, w – среднесезонный показатель уровня воды, a – скорость амплификации вируса

онный анализ проводили на основе значений среднегодовых показателей уровня и температуры воды на гидрологических постах г. Волгограда и п.г.т. Средняя Ахтуба за период 2001–2017 гг., а также численности комаров на территории Волгоградской области (табл. 7).

Полученные результаты позволили установить наличие высокой силы корреляционной связи среднегодового уровня воды на гидрологическом посту г. Волгограда и среднегодовой численности переносчиков ЛЗН, а также среднюю силу статистической связи данных факторов для гидрологического поста п.г.т. Средняя Ахтуба. В то же время среднегодовая температура воды не оказывает значимого влияния на численность переносчиков.

Таким образом, можно констатировать, что повышение уровня воды в р. Волге оказывает благоприятное воздействие на рост численности переносчиков ЛЗН на территории Волгоградской области. Однако для более детального изучения корреляционных связей анализируемых факторов необходимо дальнейшее углубленное исследование с расширенным набором статистических данных.

Концептуальная схема прогнозно-аналитической модели. С учетом установленных корреляционных взаимоотношений между анализируемыми факторами, а также выдвинутых гипотез нами была разработана концептуальная схема прогнозно-аналитической модели (рис. 7).

Сформулированная концепция требует дальнейшего математического описания с использованием различных подходов, выполнения расчетов на основе данных ретроспективного и оперативного эпидемиологического анализа, а также оценки прогностической ценности полученных результатов.

Выводы. Проведенный корреляционный анализ позволил подтвердить, что для Волгоградской области наиболее значимым фактором, оказывающим воздействие на заболеваемость ЛЗН, является температура воздуха. Это воздействие характеризуется сочетанным влиянием на скорость прогревания и уровень воды в природных водоемах, являющихся основным местом размножения переносчиков ВЗН. Также данный фактор оказывает воздействие на численность популяций комаров, их суточную активность и уровень инфицированности возбудителем ЛЗН.

При проведении корреляционного анализа было установлено, что использование подробных статистических данных (таких, как среднемесячные показатели температуры воздуха, численности переносчиков и т.д., по сравнению со среднегодовыми показателями) позволяет увеличить точность оценки корреляционных связей между анализируемыми факторами.

В ходе исследования подтверждена гипотеза о кумулятивном действии температуры воздуха на заболеваемость ЛЗН и численность переносчиков ВЗН в Волгоградской области. Причем это влияние четко прослеживалось именно в годы с максимальными значениями заболеваемости ЛЗН (1999, 2010, 2012 гг.).

Также полученные результаты позволили выявить статистическую связь различной силы между численностью переносчиков ЛЗН, температурой воздуха, среднегодовым уровнем воды и заболеваемостью ЛЗН.

В целом корреляционные взаимосвязи температуры окружающей среды с другими факторами, рассмотренными в данном исследовании, являются сложными, так как имеют разнонаправленный характер (могут оказывать как позитивное, так и не-

гативное влияние на численность переносчиков и природные биотопы их обитания), изменяющуюся силу влияния, определяемую существованием оптимальных температурных границ (в которых рост численности популяции переносчиков и их инфицированность происходят быстрее), а также запаздывающее воздействие во времени.

На основании полученных результатов была разработана концепция прогнозно-аналитической модели для оценки развития эпидемиологической ситуации по ЛЗН на территории Волгоградской области. Математическое описание полученной схемы с оценкой ее прогностической ценности, что является предметом нашего дальнейшего исследования, позволит повысить точность прогнозов и обозначить перспективы применения данного подхода и в других регионах Российской Федерации.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Family: Flaviviridae. Genus: Flavivirus [Электронный ресурс] // International Committee on Taxonomy of Viruses. – 2021. – URL: https://talk.ictvonline.org/ictv-reports/ictv_online_report/positive-sense-rna-viruses/w/flaviviridae/360/genus-flavivirus (дата обращения: 14.04.2022).
2. Vector competence of *Culex neavei* and *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) from Senegal for lineages 1, 2, Koutango and a putative new lineage of West Nile virus / G. Fall, M. Diallo, C. Loucoubar, O. Faye, A.A. Sall // *Am. J. Trop. Med. Hyg.* – 2014. – Vol. 90, № 4. – P. 747–754. DOI: 10.4269/ajtmh.13-0405
3. On the potential roles of ticks and migrating birds in the ecology of West Nile virus / K. Hagman, C. Barbotis, C. Ehrenborg, T. Fransson, T.G.T. Jaenson, P.-E. Lindgren, A. Lundkvist, F. Nyström [et al.] // *Infect. Ecol. Epidemiol.* – 2014. – Vol. 4. – P. 20943. DOI: 10.3402/iee.v4.20943
4. Vector competence of three North American strains of *Aedes albopictus* for West Nile virus / M.R. Sardelis, M.J. Turell, M.L. O'Guinn, R.G. Andre, D.R. Roberts // *J. Am. Mosq. Control Assoc.* – 2002. – Vol. 18, № 4. – P. 284–289.
5. West Nile virus infection of the placenta / J.G. Julander, Q.A. Winger, L.F. Rickords, P.-Y. Shi, M. Tilgner, I. Binduga-Gajewska, R.W. Sidwell, J.D. Morrey // *Virology.* – 2006. – Vol. 347, № 1. – P. 175–182. DOI: 10.1016/j.virol.2005.11.040
6. Hinckley A.F., O'Leary D.R., Hayes E.B. Transmission of West Nile virus through human breast milk seems to be rare // *Pediatrics.* – 2007. – Vol. 119, № 3. – P. e666–e671. DOI: 10.1542/peds.2006-2107
7. Transmission of West Nile virus from an organ donor to four transplant recipients / M. Iwamoto, D.B. Jernigan, A. Guasch, M.J. Trepka, C.G. Blackmore, W.C. Hellinger, S.M. Pham, S. Zaki [et al.] // *N. Engl. J. Med.* – 2003. – Vol. 348, № 22. – P. 2196–2203. DOI: 10.1056/NEJMoa022987
8. Результаты мониторинга возбудителя лихорадки Западного Нила в Российской Федерации в 2019 г. и прогноз развития эпидемической ситуации на 2020 г. / Е.В. Путинцева, И.О. Алексейчик, С.Н. Чеснокова, С.К. Удовиченко, Н.В. Бородай, Д.Н. Никитин, Е.А. Агаркова, А.А. Батулин [и др.] // *Проблемы особо опасных инфекций.* – 2020. – № 1. – С. 51–60. DOI: 10.21055/0370-1069-2020-1-51-60
9. Predictive modelling of Ross River virus notifications in southeastern Australia / Z. Cutcher, E. Williamson, S.E. Lynch, S. Rowe, H.J. Clothier, S.M. Firestone // *Epidemiol. Infect.* – 2017. – Vol. 145, № 3. – P. 440–450. DOI: 10.1017/S0950268816002594
10. Giordano B.V., Kaur S., Hunter F.F. West Nile virus in Ontario, Canada: A twelve-year analysis of human case prevalence, mosquito surveillance, and climate data // *PLoS One.* – 2017. – Vol. 12, № 8. – P. e0183568. DOI: 10.1371/journal.pone.0183568
11. Assessing human risk of illness with West Nile virus mosquito surveillance data to improve public health preparedness / S. Karki, N.E. Westcott, E.J. Muturi, W.M. Brown, M.O. Ruiz // *Zoonoses Public Health.* – 2018. – Vol. 65, № 1. – P. 177–184. DOI: 10.1111/zph.12386
12. Kwan J.L., Klugh S., Reisen W.K. Antecedent avian immunity limits tangential transmission of West Nile virus to humans // *PLoS One.* – 2012. – Vol. 7, № 3. – P. e34127. DOI: 10.1371/journal.pone.0034127
13. Weather and land cover influences on mosquito populations in Sioux Falls, South Dakota / T.-W. Chuang, M.B. Hildreth, D.L. Vanroekel, M.C. Wimberly // *J. Med. Entomol.* – 2011. – Vol. 48, № 3. – P. 669–679. DOI: 10.1603/me10246
14. Factors affecting the geographic distribution of West Nile virus in Georgia, USA: 2002–2004 / S.E.J. Gibbs, M.C. Wimberly, M. Madden, J. Masour, M.J. Yabsley, D.E. Stallknecht // *Vector Borne Zoonotic Dis.* – 2006. – Vol. 6, № 1. – P. 73–82. DOI: 10.1089/vbz.2006.6.73
15. Stewart-Ibarra A.M., Lowe R. Climate and non-climate drivers of Dengue epidemics in southern coastal Ecuador // *Am. J. Trop. Med. Hyg.* – 2013. – Vol. 88, № 5. – P. 971–981. DOI: 10.4269/ajtmh.12-0478
16. Использование географической информационной системы в эпидемиологическом надзоре на примере арбовирусных инфекций / К.В. Жуков, С.К. Удовиченко, Д.Н. Никитин, Д.В. Викторов, А.В. Топорков // *Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение.* – 2021. – Т. 10, № 2 (37). – С. 16–24. DOI: 10.33029/2305-3496-2021-10-2-16-24

17. Ганушкина Л.А., Дремова В.П. Комары р. *Culex*, характеристика отдельных видов, эпидемиологическое значение, контроль численности. Сообщение 1. Характеристика рода *Culex*, отдельных видов, эпидемиологическое значение (обзор) // РЭТ-инфо. – 2006. – № 4. – С. 7–10.

18. Виноградова Е.Б. Комары комплекса *Culex ripiens* в России // Труды зоологического института РАН. – 1997. – Т. 271. – С. 307.

19. The effect of temperature on life history traits of *Culex* mosquitoes / A.T. Ciota, A.C. Maccacchiero, A.M. Kilpatrick, L.D. Kramer // *J. Med. Entomol.* – 2014. – Vol. 51, № 1. – P. 55–62. DOI: 10.1603/me13003

20. Experimental infection of North American birds with the New York 1999 strain of West Nile virus / N. Komar, S. Langevin, S. Hinten, N. Nemeth, E. Edwards, D. Hettler, B. Davis, R. Bowen, M. Bunning // *Emerg. Infect. Dis.* – 2003. – Vol. 9, № 3. – P. 311–322. DOI: 10.3201/eid0903.020628

Разработка концептуальной схемы прогнозно-аналитической модели заболеваемости лихорадкой Западного Нила на основе оценки природно-климатических факторов (на примере Волгоградской области) / К.В. Жуков, Д.Н. Никитин, Д.В. Коврижных, Д.В. Викторов, А.В. Топорков // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 4. – С. 124–136. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.12

UDC 616.98:578.833.28(470.45)
DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.12.eng



Research article

A CONCEPTUAL SCHEME OF A PREDICTIVE-ANALYTICAL MODEL FOR DESCRIBING INCIDENCE OF WEST NILE FEVER BASED ON WEATHER AND CLIMATE ESTIMATION (EXEMPLIFIED BY THE VOLGOGRAD REGION)

K.V. Zhukov¹, D.N. Nikitin¹, D.V. Kovrizhnykh², D.V. Viktorov¹, A.V. Toporkov¹

¹Volgograd Scientific Research Anti-Plague Institute, 7 Golubinskaya Str., Volgograd, 400131, Russian Federation

²Volgograd State Medical University, 1 Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, 400131, Russian Federation

The present study focuses on weather and climatic factors influencing the incidence of West Nile fever (WNF) in the Volgograd region. We aimed to describe a relationship between these factors and the WNF incidence and to create a conceptual scheme of a predictive-analytical model for making forecasts how an epidemiological situation would develop in future.

According to this aim, we selected an approach that involved identifying a statistical correlation between the analyzed factors and the WNF incidence in the Volgograd region and estimating the power of this correlation. The study primarily relied on using correlation analysis that was followed by assessing authenticity of the study results. The obtained data made it possible to establish that air temperature was a leading potentiating factor in the Volgograd region. It produced certain effects that varied in their intensity on a whole set of abiotic and biotic factors (water level and temperature, numbers and activity of carriers, how fast the virus amplifies in carriers, etc.).

The study established that use of comprehensive statistical data (average monthly indicators) allowed more precise estimation of correlations. We also considered and confirmed a hypothesis about a delayed effect produced by air temperature on population incidence and numbers of West Nile virus carriers in the Volgograd region; it was the most apparent in years with the maximum numbers of infected people (1999, 2010, and 2012). We revealed a statistical correlation between air temperature and average annual water level and the WNF incidence among population and the number of West Nile virus carriers. There was a strong correlation between the number of carriers and the WNF incidence. A conceptual scheme of a predictive model for determining rate of the WNF incidence in Volgograd region was created based on the statistical analysis results.

Keywords: West Nile fever, West Nile virus, epidemic situation, predictive-analytical model, factor estimation, weather and climatic peculiarities, correlation analysis, WN virus carriers, Volgograd region.

© Zhukov K.V., Nikitin D.N., Kovrizhnykh D.V., Viktorov D.V., Toporkov A.V., 2022

Kirill V. Zhukov – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher (e-mail: zhukofff@inbox.ru; tel.: +7 (8442) 39-33-48; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-3257>).

Dmitrii N. Nikitin – researcher (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; tel.: +7 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6940-0350>).

Denis V. Kovrizhnykh – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor (e-mail: post@volgmed.ru; tel.: +7 (8442) 38-50-05; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3253-3007>).

Dmitry V. Viktorov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research and Experimental Work (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; tel.: +7 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2722-7948>).

Andrey V. Toporkov – Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, director (e-mail: vari2@sprint-v.com.ru; tel.: +7 (8442) 37-37-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4657>).

References

1. Family: Flaviviridae. Genus: Flavivirus. *International Committee on Taxonomy of Viruses*, 2021. Available at: https://talk.ictvonline.org/ictv-reports/ictv_online_report/positive-sense-rna-viruses/w/flaviviridae/360/genus-flavivirus (April 14, 2022).
2. Fall G., Diallo M., Loucoubar C., Faye O., Sall A.A. Vector competence of *Culex neavei* and *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) from Senegal for lineages 1, 2, Koutango and a putative new lineage of West Nile virus. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 2014, vol. 90, no. 4, pp. 747–754. DOI: 10.4269/ajtmh.13-0405
3. Hagman K., Barboutis C., Ehrenborg C., Fransson T., Jaenson T.G.T., Lindgren P.-E., Lundkvist A., Nyström F. [et al.]. On the potential roles of ticks and migrating birds in the ecology of West Nile virus. *Infect. Ecol. Epidemiol.*, 2014, vol. 4, pp. 20943. DOI: 10.3402/iee.v4.20943
4. Sardelis M.R., Turell M.J., O’Guinn M.L., Andre R.G., Roberts D.R. Vector competence of three North American strains of *Aedes albopictus* for West Nile virus. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 2002, vol. 18, no. 4, pp. 284–289.
5. Julander J.G., Winger Q.A., Rickords L.F., Shi P.-Y., Tilgner M., Binduga-Gajewska I., Sidwell R.W., Morrey J.D. West Nile virus infection of the placenta. *Virology*, 2006, vol. 347, no. 1, pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.virol.2005.11.040
6. Hinckley A.F., O’Leary D.R., Hayes E.B. Transmission of West Nile virus through human breast milk seems to be rare. *Pediatrics*, 2007, vol. 119, no. 3, pp. e666–e671. DOI: 10.1542/peds.2006-2107
7. Iwamoto M., Jernigan D.B., Guasch A., Trepka M.J., Blackmore C.G., Hellinger W.C., Pham S.M., Zaki S. [et al.]. Transmission of West Nile virus from an organ donor to four transplant recipients. *N. Engl. J. Med.*, 2003, vol. 348, no. 22, pp. 2196–2203. DOI: 10.1056/NEJMoa022987
8. Putintseva E.V., Alekseychik I.O., Chesnokova S.N., Udovichenko S.K., Boroday N.V., Nikitin D.N., Agarkova E.A., Baturin A.A. [et al.]. Results of the West Nile Fever Agent Monitoring in the Russian Federation in 2019 and the Forecast of Epidemic Situation Development in 2020. *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2020, no. 1, pp. 51–60. DOI: 10.21055/0370-1069-2020-1-51-60 (in Russian).
9. Cutcher Z., Williamson E., Lynch S.E., Rowe S., Clothier H.J., Firestone S.M. Predictive modelling of Ross River virus notifications in southeastern Australia. *Epidemiol. Infect.*, 2017, vol. 145, no. 3, pp. 440–450. DOI: 10.1017/S0950268816002594
10. Giordano B.V., Kaur S., Hunter F.F. West Nile virus in Ontario, Canada: A twelve-year analysis of human case prevalence, mosquito surveillance, and climate data. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 8, pp. e0183568. DOI: 10.1371/journal.pone.0183568
11. Karki S., Westcott N.E., Muturi E.J., Brown W.M., Ruiz M.O. Assessing human risk of illness with West Nile virus mosquito surveillance data to improve public health preparedness. *Zoonoses Public Health*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 177–184. DOI: 10.1111/zph.12386
12. Kwan J.L., Kluh S., Reisen W.K. Antecedent avian immunity limits tangential transmission of West Nile virus to humans. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. e34127. DOI: 10.1371/journal.pone.0034127
13. Chuang T.-W., Hildreth M.B., Vanroekel D.L., Wimberly M.C. Weather and land cover influences on mosquito populations in Sioux Falls, South Dakota. *J. Med. Entomol.*, 2011, vol. 48, no. 3, pp. 669–679. DOI: 10.1603/me10246
14. Gibbs S.E.J., Wimberly M.C., Madden M., Masour J., Yabsley M.J., Stallknecht D.E. Factors affecting the geographic distribution of West Nile virus in Georgia, USA: 2002–2004. *Vector Borne Zoonotic Dis.*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 73–82. DOI: 10.1089/vbz.2006.6.73
15. Stewart-Ibarra A.M., Lowe R. Climate and non-climate drivers of Dengue epidemics in southern coastal Ecuador. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 2013, vol. 88, no. 5, pp. 971–981. DOI: 10.4269/ajtmh.12-0478
16. Zhukov K.V., Udovichenko S.K., Nikitin D.N., Viktorov D.V., Toporkov A.V. Application of Geographic Information Systems in epidemiological surveillance for West Nile Fever and other arbovirus infections at the modern stage. *Infektsionnye bolezni: novosti, mneniya, obuchenie*, 2021, vol. 10, no. 2 (37), pp. 16–24. DOI: 10.33029/2305-3496-2021-10-2-16-24 (in Russian).
17. Ganushkina L.A., Dremova V.P. Mosquitoes of g. *Culex*, description of some species, epidemiological significance, pest control. Report No. 1. Description of genus *Culex* and some species, epidemiological significance. *RET-info*, 2006, no. 4, pp. 7–10 (in Russian).
18. Vinogradova E.B. Komary kompleksa *Culex pipiens* v Rossii [Mosquitoes of the *Culex pipiens* complex in Russia]. *Trudy zoologicheskogo instituta RAN*, 1997, vol. 271, pp. 307 (in Russian).
19. Ciota A.T., Matarachero A.C., Kilpatrick A.M., Kramer L.D. The effect of temperature on life history traits of *Culex* mosquitoes. *J. Med. Entomol.*, 2014, vol. 51, no. 1, pp. 55–62. DOI: 10.1603/me13003
20. Komar N., Langevin S., Hinten S., Nemeth N., Edwards E., Hettler D., Davis B., Bowen R., Bunning M. Experimental infection of North American birds with the New York 1999 strain of West Nile virus. *Emerg. Infect. Dis.*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 311–322. DOI: 10.3201/eid0903.020628

Zhukov K.V., Nikitin D.N., Kovrizhnykh D.V., Viktorov D.V., Toporkov A.V. A conceptual scheme of a predictive-analytical model for describing incidence of west nile fever based on weather and climate estimation (exemplified by the Volgo-grad region). *Health Risk Analysis*, 2022, no. 4, pp. 124–136. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.12.eng

Получена: 28.07.2022

Одобрена: 13.12.2022

Принята к публикации: 18.12.2022